

Remote sensing of the geocorona and exosphere using the NOZOMI ultraviolet imaging spectrometer

著者	伊藤 裕一
号	44
学位授与番号	1840
URL	http://hdl.handle.net/10097/38836

氏 名・(本籍)	いとう ゆういち 伊 藤 裕 一
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1 8 4 0 号
学位授与年月日	平 成 1 3 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科, 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学 位 論 文 題 目	Remote sensing of the geocorona and exosphere using the NOZOMI ultraviolet imaging spectrometer (のぞみ探査衛星紫外撮像分光計による地球コロナと外気圏のリモートセンシング)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 福 西 浩 教 授 森 岡 昭, 岡 野 章 一, 小 野 高 幸 講 師 高 橋 幸 弘

論 文 目 次

Contents

Abstract

Acknowledgments

1 General Introduction

- 1.1 Exosphere as the boundary region between atmosphere and space
- 1.2 Role of the exosphere in the water loss problem of Mars
- 1.3 Review of geocorona studies
- 1.4 Outline of the NOZOMI spacecraft
- 1.5 Purpose of this thesis

2 Development of Hydrogen and Deuterium Absorption Cells on Board the NOZOMI Spacecraft

- 2.1 Ultraviolet imaging spectrometer on board the NOZOMI spacecraft
- 2.2 Characteristics of the hydrogen absorption cell technique
- 2.3 Principle of the hydrogen and deuterium absorption cell technique
- 2.4 Principle of D/H ratio measurement
- 2.5 Development of hydrogen and deuterium absorption cells on board the NOZOMI spacecraft
 - 2.5.1 Selection of materials
 - 2.5.2 Manufacturing process
- 2.6 Sensitivity of the hydrogen and deuterium absorption cell photometer on board the NOZOMI spacecraft
- 2.7 Summary

- 3 Calibration of Absorption Cell Using the High Resolution Vacuum Ultraviolet Spectrometer 6VOPE
 - 3.1 Previous calibration methods
 - 3.2 Measurement of absorption cell profiles
 - 3.2.1 Synchrotron radiation
 - 3.2.2 6VOPE Spectrometer
 - 3.2.3 Calibration of absorption cell profiles
 - 3.3 Data analyses
 - 3.3.1 Subtraction of stray light
 - 3.3.2 Determination of the spectrometer slit function
 - 3.3.3 Least square fitting of Gaussian function
 - 3.3.4 Fitting results
 - 3.4 Discussions
 - 3.4.1 Kinetic temperatures of hydrogen and deuterium atoms in the absorption cells
 - 3.4.2 Design of flight-model absorption cells
 - 3.5 Summary
- 4 Observation of the Hydrogen Geocorona with the Ultraviolet Imaging Spectrometer on Board the NOZOMI Spacecraft
 - 4.1 Observations of the geocorona on the orbit around the Earth
 - 4.2 Determination of the UVS-G slit function using the interstellar hydrogen Lyman α emission
 - 4.2.1 Interstellar hydrogen Lyman α emission
 - 4.2.2 Determination of the UVS-G slit function
 - 4.3 September 24, 1998 observation
 - 4.3.1 UVS-G data
 - 4.3.2 UVS-P data
 - 4.4 Summary
- 5 Monte Carlo Simulation of the Hydrogen Geocorona
 - 5.1 Description of the radiative transfer equation
 - 5.2 Monte Carlo simulation of a Lyman α resonance scattering process
 - 5.2.1 Lyman α resonant scattering process
 - 5.2.2 Simulation procedure and calculation conditions
 - 5.2.3 Altitude distribution of the hydrogen geocorona
 - 5.2.4 Lyman α photon distributions obtained from the developed Monte Carlo model
 - 5.2.5 Estimation of Lyman α column emission rate
 - 5.3 Least square fitting to the observation data
 - 5.4 Retrieval of the exospheric temperature from absorption cell photometer data
 - 5.4.1 Temperature retrieval with a Gaussian profile assumption
 - 5.4.2 Temperature retrieval including the self-absorption effect
 - 5.5 Discussions and Summary

- 6 Remote Sensing of the Martian Exosphere and Corona
 - 6.1 Monte Carlo simulation of the Martian hydrogen corona
 - 6.2 Retrieval of the spatial structure of the Martian hydrogen corona
 - 6.3 Retrieval of the Martian deuterium corona and D/H ratio
 - 6.3.1 Method for retrieving the D/H ratio from absorption cell photometer data
 - 6.3.2 Simulation of signal-to-noise ratio for Martian D/H ratio measurement
 - 6.3.3 Simulation of signal-to-noise ratio for Martian deuterium corona measurement
 - 6.4 Summary

7 Summary and Conclusion

References

論文内容要旨

30年前に始まった惑星探査は我々の最も身近な火星のその過去に水が存在することを教えてくれた。火星の表層には水によって形成されたと考えられる地質学的痕跡があるが、現在の火星表層では水の存在が確認されておらず、このパラドクスは惑星科学上の重要な問題となっている。様々な説がこの問題の解として提起されている中で、大気を経由した水の宇宙空間への散逸効果がこの問題に対する解として注目されている。

大気散逸学は、超高層大気物理学上の主要な学問として飛翔体観測などによって1970年代以降に進んだ。研究対象とされる外気圏(コロナ)とは、大気の最外層に位置付けられる高度500 km以上の大気層である。この領域は宇宙空間との接点領域であり、開放系の概念を持つことが特徴的である。これまでの幾度もの地球周回衛星及び惑星探査衛星の観測により、地球及び金星の外気圏の観測が行なわれてきている。それによれば、外気圏からの大気散逸率は太陽活動と高い相関があり、また惑星が持つ磁気圏の存在が惑星の外気圏の散逸速度を左右し、その結果大気の進化過程にも大きな影響を及ぼしていることが分かりつつある。

のぞみ火星探査衛星は、これまで米国・旧ソ連邦のいずれの火星ミッションでも未知とされてきた火星の超高層大気と太陽活動との相互作用の関係を解明のために計画されたミッションである。このミッションには14の科学計測器が搭載されており、我々のグループは紫外撮像分光計（略称UVS, 回折格子型紫外線分光器と水素・重水素吸収セル付きライマン α 線フォトメータの2つからなる）を担当している。UVSは以下の問題の解明を目指している。すなわち、

1. 火星コロナ構造を決定づける支配的な物理過程は何か？
2. 太陽風や太陽極紫外線強度の変化は火星外気圏の構造にどのような影響を及ぼすのか？
3. 火星外気圏の研究は火星水消失問題を解く手がかりを与えてくれるだろうか？

これらの問題を解明するためには、火星外気圏構造とその変動過程を理解することが最も重要な研究課題となる。本研究の目的は、のぞみ火星探査衛星に搭載される水素/重水素吸収セル付きライマン α 線フォトメータ(UVS-P)を開発し、その観測データから火星外気圏の密度、温度、構造をリモートセンシングする手法を確立することである。開発した外気圏のリモートセンシング法はのぞみ探査衛星が地球周

回軌道上にある時に観測した地球コロナのデータによって評価する。

まず吸収セルフォトメータの開発を3つの段階で進めた。第1に吸収セルの小型化、そして第2に熱的に安定な吸収セルの開発、そして第3に開発された吸収セルの正確な較正である。のぞみ搭載科学機器の搭載重量制限から、吸収セルフォトメータの開発の最終段階で極めて厳しい重量削減が課せられた。UVSの重量は3 kg以下となり、吸収セルの大幅な小型化を進めた。その結果、セルの最終的な外形は長さ60 mm、直径25 mmで重さは30 gとなり、これにより、UVSの大幅な重量削減に成功した。UVSを含め搭載される14の科学計測器の総重量は33 kgとなり、これまでの火星探査機の中で最も軽い衛星となった。

また重量削減と並行して、長期にわたって動作するようにセルの材質に関しても十分な検討とテストを行なった。紫外分光用光学材質の制限から窓材には MgF_2 を選択した。また機密性を高めるためにガラスを熱的に接合する必要があるが、そのためにセルの本体に軟質ガラスを用いることにより、窓材として用いた MgF_2 結晶とフィラメント接合部に用いたボタンステムと熱伝導係数を同一になるようにした。これにより小型で熱的に安定な吸収セルを製造することが可能となった。また国立天文台の較正装置を用いフォトメータの光学感度特性を評価した。

ついで、高エネルギー物理学研究所において、水素と重水素セルの較正を行なった。吸収セル法は入射エミッションとセルの吸収セルプロファイルのコンボリューションを利用するため、入射光のプロファイルを導出するためには、吸収セルのプロファイルの正確な測定が絶対条件となる。この点について、これまでの科学衛星に搭載された吸収セルが、間接推定によってしか較正されていないのに対し、今回の較正が全く新しい画期的な較正法となっている。本研究では高エネルギー物理学研究所の放射光を光源とした世界で最も分解能の高い大型紫外分光計(6VOPE)を用いて吸収セルのキャリブレーションを行なった。25,000の波長分解能はセルの温度幅を分光するには十分な値である。ガウス関数フィッティングによって吸収セルプロファイルをセル内の水素原子の温度と光学的厚さの2つのパラメータで表すことに成功した。これによりセルの性能を定量的に評価できた。電力制限の3 W以内で、水素セルの光学的厚さは約6程度、温度幅は約650 K、重水素セルの光学的厚さは約3程度、温度は約850 Kを達成した。そして最終的にのぞみ衛星に搭載した吸収セルが、現実の衛星運動によるドップラーシフトを考慮しても2 W以内で基準の性能を満たすことを確認した。

1998年7月4日にのぞみ衛星は打ち上げられた。その後地球周回軌道において、1998年9月24日に地球コロナと月のテスト観測が行われた。このテスト観測から得られたデータを、(1)のぞみ衛星の観測機器の性能評価と、(2)実際の観測データに基づく地球コロナ物理量導出法の確立のために用いた。

まず最初に、観測機器の性能評価として以下の3点を行った。①星間水素ライマン α 線によって回折格子型分光器(UVS-G)の装置関数を導出した。②121.6 nm (ライマン α 線)、130 nm (酸素原子輝線)、170 nmの3波長で強度の空間分布を出し、地球コロナは地球半径の10倍程度まで広がっていることを確認した。③吸収セルライマン α フォトメータ(UVS-P)のデータの一部に太陽散乱光が迷光として混入していることを確認した。③の原因として、中性質量分析計のカバーで反射した太陽光の混入と考えられるが、火星軌道投入後にはカバーは外されるので、火星軌道上では問題にはならないものであると結論された。

次に、外気圏とコロナのリモートセンシング法を確立するために、9月24日に実際に取得されたUVS-Pのデータについて、観測されたデータを最大限に生かした解析を行った。この観測データは、以下の2つの特徴をもつ。きわめて遠方からの観測であったために、地球コロナの視野角が小さく有効観測データ数で6点に限られていること。コロナは光学的に厚く多重散乱過程による励起効果が大いこと。そこで、地球水素コロナ分布をモンテカルロ計算によるシミュレーションで求め、観測結果と比較した。すなわち、観測したコロナとモデルによって計算されたコロナとの最小二乗フィッティングによってモデルのパ

ラメータを求めた。その結果、Hodges [1994]によって計算されたF10.7 = 130モデルを0.7倍したコロナ分布が最も近いデータを再現できると結論された。またこのコロナ観測では吸収セルによる観測も行われており、外気圏温度の導出を試みた。ガウス型線形モデルとプロファイルの自己吸収を考慮したモデルの2つの方法で推定を行った結果、ほぼ同程度の外気圏温度 1350 ± 350 Kを得た。この解の導出法は火星の観測でも有効であり、今後の火星観測に対しても、同様の手法を用いる予定である。

さらに、のぞみは2003年12月に火星周回軌道に投入されるが、火星周回軌道からの観測をシミュレーションした。この観測はのぞみの離心率の大きい衛星軌道によって、空間的自由度の高い観測がなされる点が非常にユニークである。まず第1に、火星水素及び重水素コロナの散乱光強度の見積もりを行った。計算の結果、火星の水素コロナおよび重水素コロナの散乱光はリム部で5000 [R] 程度、そして重水素コロナの場合は20 [R] 程度であることが分かった。またモンテカルロ計算の結果、火星のコロナの励起メカニズムがほぼ1次散乱光で説明できることがわかった。次に散乱光の励起過程を考慮して2次元的分布（太陽・火星軸のまわりに対称）を仮定しコロナの空間分布の導出法について考察を行った。散乱光のフィッティングの結果、昼間側ではフィッティングにより、解が一意に導出できる可能性がある一方で、夜側のみのフィッティングでは解が一意に決まらない可能性があることが分かった。そして最後にD/H吸収セル法によるD/H比の導出法について考察した。まず重水素・水素吸収セル法の理論的な背景を議論した。その結果、水素セルの透過レベルにより、重水素コロナのデータも影響を受けることが分かった。また予想される散乱光強度を利用することにより、重水素コロナのイメージングのシミュレーションを行なった。その結果、最も明るいリム付近で、1時間の積分時間でSN比は ~ 2 程度で観測できることがわかった。

さて、以上で確立されたりリモートセンシング技術は、以下の2点で新しい知見をもたらすであろう。まず第1に、これまでの火星コロナ観測ミッションではフライバイでの観測しかないが、のぞみ探査衛星では時間空間的分解能の高い観測が行なわれること、そして第2に、のぞみに搭載されている吸収セルフォトメータにより高分解能分光・温度測定、および、重水素／水素比の測定が世界に先駆けて行われることである。以上の2点は、火星コロナの空間構造の推定、そして重水素コロナの動的な描像を知る上で画期的であり、この論文で確立したりリモートセンシング技術は今後の惑星科学の発展に大きく寄与するものと考えられる。さらに加えて、ここで確立されたりリモートセンシング技術は将来の磁気圏撮像技術にも応用できる一面も持つ。そのため今後ますます必要性が高まる宇宙天気予報に対しても、十分な貢献が期待されると考えられる。

以上

論文審査の結果の要旨

火星探査衛星「のぞみ」は、我が国初の惑星探査ミッションとして、火星の超高層大気と太陽風との相互作用過程の解明を目的に計画された。火星は地球と異なり、磁場をもたないことから、太陽風は磁場によって遮蔽されることなく大気圏深く流入し、大気と太陽風プラズマの直接相互作用が起こっている。その結果、火星大気は、大気上端の外気圏を通して宇宙空間に効率よく散逸していると考えられている。本研究の目的は、この散逸の過程を解明するために、のぞみ探査衛星に搭載された紫外撮像分光計（UVS）の一部である水素・重水素吸収セル付きライマン α フォトメーターを開発し、その観測データから、火星外気圏コロナの密度・温度構造および重水素・水素(D/H) 比をリモートセンシングする手法を確立することである。

吸収セル法の優れている点は、吸収プロファイルの測定からコロナの密度情報だけでなく温度情報も得られることである。開発で最も創意工夫を要した点は、吸収セルの小型化と長期安定性である。最終的に、長さ60 mm、直径25 mm、重さ30 g、2 Wのフィラメント消費電力で十分な光学的厚さをもつセルの開発に成功した。また、開発したセルの吸収プロファイルを高エネルギー物理学研究所の超高分解能紫外分光計で測定し、セルの吸収パラメーターを精密に決定した。「のぞみ」は1998年7月に打ち上げられ、同年12月の地球離脱まで地球周回軌道上にあったが、この機会に、開発した吸収セルが当初の性能を有していることを確認し、また、開発した解析手法を用い、UVS観測データから地球水素コロナの密度と温度を求めた。さらに、2003年12月に予定されている火星周回軌道投入後のUVSによる火星水素コロナとD/H比観測に関するシミュレーションを行い、UVSがこれらを観測することができる十分な性能をもっていることを示した。

これまで火星周回軌道上から外気圏コロナの観測は行われたことがなく、また、D/H比の観測も行われたことがない。本研究によってこれらをリモートセンシングするための計測器と解析手法が確立した。これは著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、伊藤裕一提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。